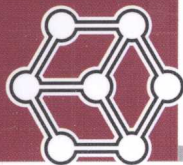


“十一五”
国家重点图书



现代煤化工技术丛书

谢克昌 主编

煤化工过程中的 污染与控制

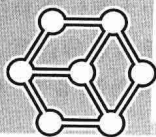
高晋生 鲁军 王杰 编著



化学工业出版社

煤化工过程中的污染与控制

“十五”
国家重点图书



现代煤化工技术丛书

谢克昌 主编

煤化工过程中的 污染与控制

高晋生 鲁军 王杰 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

MEI HUAGONG GUOCHENGZHONG DE WURAN YU KONGZHI

本书为《现代煤化工技术丛书》分册之一。全书分4章,第1章为煤炭与环境,介绍煤炭对环境的影响、有关法规和对策;第2章为煤化工过程中有害元素的迁移与控制,涉及的有害元素有硫、氮及主要微量元素,如汞、砷、氟、氯等;第3章为煤化工过程中主要污染物的净化技术,包括重污染废水处理,废气(烟气)除尘、脱硫、脱硝、脱氯和脱重金属等;第4章为煤化工过程中CO₂的减排、储存与利用技术。本书以科学发展观为指导,从资源-能源-环境一体化高度,致力于煤化工过程的清洁化和无害化。

本书适合于从事煤化工、煤炭能源转化和环境工程领域的工程技术人员、科研人员以及相关专业的高校师生。

图书在版编目(CIP)数据

煤化工过程中的污染与控制/高晋生,鲁军,王杰
编著. —北京:化学工业出版社,2010.5
(现代煤化工技术丛书)
ISBN 978-7-122-07808-7

I. 煤… II. ①高…②鲁…③王… III. 煤化工-污
染控制 IV. X784

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第031741号

责任编辑:路金辉 靳星瑞
责任校对:周梦华

文字编辑:糜家铃
装帧设计:王晓宇

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印 刷:北京永鑫印刷有限责任公司
装 订:三河市万龙印装有限公司
720mm×1000mm 1/16 印张20³/₄ 字数380千字 2010年8月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:68.00元

版权所有 违者必究

《现代煤化工技术丛书》编委会

主任：谢克昌 中国工程院副院长，中国科协副主席，中国工程院院士
李勇武 中国石油和化学工业联合会会长

委员（以姓氏汉语拼音排序）：

陈清如 中国工程院院士，中国矿业大学教授

房鼎业 华东理工大学教授

俸培宗 化学工业出版社社长

高晋生 华东理工大学教授

金涌 中国工程院院士，清华大学教授

李大尚 赛鼎工程有限公司，国家级设计大师

李文英 太原理工大学教授，长江学者特聘教授

李永旺 中国科学院山西煤炭化学研究所研究员

李勇武 中国石油和化学工业联合会会长

李忠 太原理工大学教授

倪维斗 中国工程院院士，清华大学教授

潘正安 化学工业出版社总编辑

邱介山 大连理工大学教授，长江学者特聘教授

王辅臣 华东理工大学教授，国家“973”项目首席科学家

谢克昌 中国工程院副院长，中国科协副主席，中国工程院院士

应卫勇 华东理工大学教授

于遵宏 华东理工大学教授

张庆庚 赛鼎工程有限公司董事长兼总经理，教授级高级工程师

张玉卓 神华集团有限责任公司总经理

《现代煤化工技术丛书》编写人员

丛书主编：谢克昌

各分册编写人员：

《煤化工概论》 谢克昌、赵炜 编著

《煤炭气化技术》 王辅臣、于遵宏 编著

《气体净化分离技术》 常丽萍、苗茂谦 编著

《煤基炭素功能材料》 邱介山 编著

《煤的等离子体转化》 吕永康、庞先勇、谢克昌 编著

《煤的溶剂萃取与应用》 魏贤勇、宋志敏等 编著

《煤的热解、炼焦和煤焦油加工》 高晋生 主编

《煤炭直接液化》 吴春来 编著

《煤炭间接液化》 李永旺 编著

《煤基合成化学品》 应卫勇 编著

《煤炭多联产系统技术及工艺过程分析》 李文英、冯杰、谢克昌 编著

《煤基醇醚燃料》 李忠、谢克昌 编著

《煤化工过程中的污染与控制》 高晋生 鲁军 王杰 编著

《煤化工设计基础》 李凡、李大尚、张庆庚 编著

2008年,中国的煤炭产量高达27.93亿吨,是1978年6.18亿吨的4.52倍,占2008年世界煤产量的42%,而增量占世界的80%以上。

多年来,在中国的能源消费结构中,煤约占70%,另外两种化石能源石油和天然气分别约占20%和3.5%;中国的电力结构中,燃煤发电一直占主导地位,比例约为77%;中国的化工原料结构中,煤炭占一半以上。中国煤炭工业协会预计到2010年全国煤炭需求量在30亿吨以上,而中国科学院和中国工程院通过战略研究预计,到2050年,煤在中国的能源消费结构比例中仍将高居首位,占40%以上,这一比例对应的煤量为37.8亿吨,比2010年的需求量多26%。由此可见,无论是比例还是数量,在较长的时期内以煤为主的能源结构和化工原料结构很难改变。

事实上,根据2008年BP公司的报告,在化石能源中,无论是中国还是世界,煤的储采比(中国45,世界133)都是石油的2倍左右。因此,尽管煤在世界的能源消费结构中仅占28%,低于石油的36%,但“煤炭在未来50年将继续是世界的主要能源之一”(英国皇家学会主席Martin Rees,路透社2008年6月10日);“越来越多的化学制品公司正在将煤作为主要原料”(美国《化工新闻》高级编辑A. H. Tullo, 2008年3月17日)。

但是,由于煤的高碳性和目前利用技术的落后,煤在作为主要能源和化工原料的同时也是环境的主要污染源。据中国工程院的资料,2006年,我国排放的 SO_2 和 NO_x 的总量达4000万吨以上,源于燃煤的比例分别为85%和60%,燃煤排放的 CO_2 和烟尘也分别占到总排放量的85%和70%。至于以煤为原料的焦炭、电石等传统煤化工生产过程,除对大气污染外,其废水、废渣对环境的影响也十分严重。据荷兰环境署统计,2006年中国的 CO_2 排放量为6.2Gt,而2007年又增加了8%。虽然我国的人均 CO_2 排放量远低于美国等发达国家,但由于化石能源的碳强度系数高(据日本能源统计年鉴,按吨标准煤计算:煤排放2.66t CO_2 ,石油排放2.02t CO_2 ,天然气排放1.47t CO_2)和我国较长时期仍以化石能源为主(中国科学院数据,到2050年,化石能源在中国能源结构中占70%,其中煤40%、石油20%、天然气10%),和其他污染物一样, CO_2 的排放与治理也必须高度重视并采取有效措施。

煤炭的上述地位和影响,对世界,特别是对中国,无疑是一种两难选择。可喜的是,“发展煤化工,开发和推广洁净煤技术是解决两难的现实选择”已成为人们的共识并取得重要进展。遗憾的是,在石油价格一度不断飙升的情况下,由于缺乏政策引导、科学规划,煤化工出现了不顾原料资源、市场需求、技术优劣等客观条件盲目发展的势头。为此,笔者将20余年来对煤化工科学发展积累的知识、实践、认

识和理解编撰成《煤化工发展与规划》一书，于2005年9月由化学工业出版社出版发行。与此同时，作为我国化学化工类图书出版之“旗舰”和科技图书出版之“先锋”的化学工业出版社，在原化工部副部长谭竹洲、李勇武的指导下，极具战略眼光，决定在全国范围内组织编写《现代煤化工技术丛书》（以下简称《丛书》），出版社诚邀笔者担任该《丛书》主编，成立了由笔者和李勇武会长（中国石油和化学工业联合会）为主任的编委会，并于2006年4月18日在太原召开《丛书》第一次编写会议。就在编委会紧锣密鼓地组织、协调、推荐作者，确定内容、审定大纲的不到两年间，国内的煤化工又有了强势的发展和规划。据有关方面的粗略统计，2007年全国煤制甲醇生产、在建、计划产能总计达6000万吨，2008年实际产量1126.3万吨；2008年二甲醚产能约410万吨，实际产量200万吨；直接和间接液化法“煤制油”的在建和计划产能也超过千万吨；技术尚未成熟的煤制低碳烯烃、醇、醚等化工原料在建和计划项目也此起彼伏，层出不穷。煤化工这种强势的发展与规划不仅面临着市场需求和技术成熟度的有力挑战，而且还受到原料煤、水资源、环境容量等条件很大限制，其中尤以水资源为甚。美国淡水研究权威、太平洋研究所所长称：“当水资源受到限制和污染，或者经济活动不受限制而且缺乏恰当的管理时，严重的社会问题就可能发生。而在中国，这些因素的积聚将产生更为严重、复杂的水资源挑战。”按现有技术，煤制甲醇、二甲醚、油（间接液化）的单位产品水耗（t/t）分别为15、22、16。虽然，大量的温室气体排放来源于化石能源无节制的使用，特别是燃煤发电和工业锅炉，但目前的煤化工产品生产工艺过程排放的温室气体也不容忽视，英国《卫报》网站说“用煤生产液体燃料的过程所产生的温室气体是常规石油燃料的两倍以上”。至于传统的煤化工产品生产技术，还对原料煤有苛刻的要求，如固定床造气需要无烟块煤或焦炭，而焦化和电石生产的原料煤是焦煤和肥煤，但这些优质煤种的保有储量仅占煤炭资源保有总量的16.9%（无烟煤）和3.7%（焦煤和肥煤）。

针对上述情况，2009年2月19日，国务院提出“停止审批单纯扩大产能的焦炭、电石等煤化工项目，坚决遏制煤化工盲目发展的势头”，并要求石化产业的调整振兴必须“技术创新、产业升级、节能减排”。这使得煤化工的发展必须以提高能效、减少能耗、降低排放为目标进行科学规划、优化选择、合理布局。但是，由于成煤物质和成煤年代等的差异所导致的煤的复杂性和煤化学工程的学科特性，煤化工具有基础研究学科交叉、工程开发技术复杂、规模生产投资巨大的显著特点。这些特点对以煤气化为基础，以一碳化学为主线，以优化集成为途径，生产各种替代燃料和化工产品的现代煤化工尤其突出。要做到煤化工产业的科学规划、健康发展就必须全面了解、充分把握这些特点。

应运而生的《现代煤化工技术丛书》正是为满足这一需求，力求通过分册组成合理、学术实用并举、集成精粹结合、内容形式统一的编撰，体现现代煤化工的特点；希冀通过对新技术、新工艺、新产品的研究、开发、应用的指导作用，促进煤

化工产业的技术进步；期望通过提供基础性、战略性、前瞻性的原理数据、可靠信息、科学思路推进煤化工产业的健康发展。为此，在选择《丛书》编撰者时，优先考虑的是理论基础扎实、学术思想活跃、资料掌握充分、实践经验丰富的分领域技术领军人或精英。在要求《丛书》分册编写时，突出体现“新、特、深、精”。新，是指四新，即新思路、新结构、新内容和新文献；特，是有特色，即写法和内容都要特，与同类著作相比，特色明显；深，是说深度，即基础论述要深，阐述规律要准；精，是要精品，即《丛书》不成“传世”之作，也要成业界人士的“案头”之作。

根据上述指导思想和编写原则，《丛书》由以下分册组成：

1. 《煤化工概论》（谢克昌、赵炜编著）：以煤的转化反应为主线，以煤的转化技术分章节，阐述煤化工的基本原理，提供煤化工的总体轮廓。

2. 《煤炭气化技术》（王辅臣、于遵宏编著）：在工艺过程分析、气化过程原理论述的基础上，比较各种气化过程的优劣，给出自主创新的煤炭气化实例。

3. 《气体净化分离技术》（常丽萍、苗茂谦编著）：以气化煤气净化与分离的科学和技术问题为基础，比较各种净化工艺与技术，以解决现存问题，提供最佳技术选择。

4. 《煤基炭素功能材料》（邱介山编著）：在提炼炭素材料基本理论和保持技术前沿性的前提下，介绍已经工业化的技术，推荐有应用前景的新技术。

5. 《煤的等离子体转化》（吕永康、庞先勇、谢克昌编著）：作为煤的非常规转化的重要组成，以多年的实验工作为基础，介绍等离子体应用于煤转化的主要技术。

6. 《煤的溶剂萃取与应用》（魏贤勇、宋志敏等编著）：从分子水平上认识煤及其衍生物中有机质组成结构，突破传统煤化工的囿限，提供实现煤在温和条件下定向转化的途径。

7. 《煤的热解、炼焦和煤焦油加工》（高晋生主编）：以煤的热解为主线，将热解、炼焦和煤焦油加工有机结合，通过新技术的阐述，推动传统煤化工的革新。

8. 《煤炭直接液化》（吴春来编著）：以扎实的理论知识和丰富的实践经验为基础，提出直接液化用煤、生产工艺的优选原则，实现理论性和应用性的并重。

9. 《煤炭间接液化》（李永旺编著）：在介绍费托合成反应基础理论、技术发展的基础上，重点对核心问题——催化剂和反应器的研发做详细阐述。

10. 《煤基合成化学品》（应卫勇编著），开发煤基合成化学品的新产品、新技术是现代煤化工的重要组成。面向企业，以阐述煤基化学品的生产技术、工艺和应用为主。

11. 《煤炭多联产系统技术及工艺过程分析》（李文英、冯杰、谢克昌编著）：以煤气化为基础的多联产是公认的煤洁净高效利用的主要技术途径，通过非多联产和多联产过程的分析给出多联产的创新优化实例。

12. 《煤基醇醚燃料》（李忠、谢克昌编著）：作为重要的车用替代燃料，结合国

内外的实践，重点介绍甲醇、二甲醚和乙醇燃料的性质、制备和应用。

13. 《煤化工过程中的污染与控制》(高晋生、鲁军、王杰编著): 在客观分析煤化工过程的对环境污染的基础上, 通过该过程中有害元素的迁移与控制论述, 介绍主要污染物的净化、减排和利用技术。

14. 《煤化工设计基础》(李凡、李大尚、张庆庚编著): 煤化工新技术、新工艺的产业化离不开整体考虑和合理设计, 而设计基础来源于全面的知识和成功的实践。

由以上《丛书》各分册的简介可以看出, 各分册独立成册, 却内涵相连, 各分册既非学术专著, 又非设计手册, 但发挥之作用却不仅在于科研、教学之参考, 更在于应用、实践之指导。鉴于中国石油和化学工业联合会、化学工业出版社对这套《丛书》寄予厚望, 国家新闻出版总署将其列为国家“十一五”重点图书, 身居煤化工“冷热不均”却舍之不得, 仍拚搏奋斗在第一线的诸位作者深感责任重大, 均表示要写成精品之作, 以飨读者。但因分册内容不同, 作者情况有别, 《丛书》难以整体同时问世, 敬请读者原谅。“纵浪大化中, 不喜亦不惧”, 煤化工的发展道路可能有起有伏, 坎坷不平, 但其在中国的地位与作用如同其理论基础和基本原理一样难以撼动, 在通过洁净煤技术, 实现高碳性的煤炭低碳化利用, 并与可再生能源一起, 促进低碳经济发展的进程中, 现代煤化工必将发挥不可替代的作用。诚望这套立意虽高远、内容难全面、力求成经典、水平限心愿的《丛书》能在煤化工界同仁的“不喜亦不惧”中, 成为读者为事业不懈追求的忠实伙伴。



2009年9月9日

前言

迄今为止，煤仍然是人类的主要能源之一，在能源消费结构中约占 1/4，对我国来说则是第一大能源，在能源消费结构中要占 2/3。但煤炭同时也是主要的大气污染源，特别是采用传统方式消费煤炭时情况更为严重。随着对环境保护的日益重视，煤炭的大规模利用受到越来越多的质疑。从我国的国情出发，推广实施洁净煤技术，实现煤的高效清洁转化利用是切实可行之路。从某种意义讲，煤的未来在很大程度上取决于这一技术能否进一步提高其先进性、有效性和适用性。可喜的是近几年来在国家的倡导之下，在煤炭开发利用中加强环境保护已成为广泛共识，其污染状况已有所改善，本书能作为“现代煤化工技术丛书”分册之一，就是很好的证明。

全书共分 4 章，第 1 章为煤炭与环境，作为概论主要介绍煤中的有害元素，煤化工中的环境问题，有关法规和洁净煤技术实施的进展等；第 2 章为煤化工过程中有害元素的迁移与控制，包括煤中有害元素——硫、氮、其他有害微量元素等的迁移与控制；第 3 章为煤化工过程中主要污染物的净化技术，包括重污染废水处理，废气（烟气）除尘、脱硫、脱硝、脱氯和脱重金属等；第 4 章为煤化工过程中 CO_2 的减排、储存与利用技术，包括 CO_2 的减排、分离回收、储存和利用等。第 1、3 章由华东理工大学鲁军教授编写，第 2、4 章由该校王杰教授编写。高晋生教授担任主编。文中没有注明的含量均为质量分数。

全书以科学发展观为指导，以促进现代煤化工的可持续发展为目标，内容力求现代、实用和新颖，注重 21 世纪的有关新技术，希望能为改变传统煤化工的“不洁”形象，实现煤炭高效清洁利用，保护生态环境做出贡献。

本书编写过程中得到许多国内外同行的热心帮助（恕不能一一列名），吴诗勇、周彦波博士和陈荔博士生等协助文字加工和格式化工作，在此谨向他们表示衷心感谢！

由于编著者水平有限，时间紧迫，虽已尽力，但肯定还有不完整、不妥帖之处，甚至有个别错误，敬请同行专家和广大读者批评指正。

编者于华东理工大学

2009.10 上海

目 录

1

煤炭与环境

1.1 煤中的有害元素（常量与非常量）	001
1.1.1 煤的元素组成	001
1.1.2 煤中微量元素的含量与分布	004
1.1.3 煤中微量元素的赋存状态	008
1.2 煤化工过程的环境污染问题	010
1.2.1 煤燃烧过程的污染排放	011
1.2.2 煤炼焦过程的污染排放	021
1.2.3 煤气化过程的污染排放	022
1.2.4 煤液化过程的污染排放	025
1.2.5 煤炭洗选过程产生的相关污染	025
1.3 与煤化工过程相关的环境保护法律与法规	027
1.3.1 大气污染物控制法律与法规	027
1.3.2 水污染物控制法律与法规	037
1.3.3 固体废弃物控制法律与法规	043
1.3.4 煤化工项目的噪声	045
1.4 洁净煤技术的实施与效果	046
1.4.1 煤炭洗选加工	046
1.4.2 型煤技术	047
1.4.3 水煤浆技术	048
1.4.4 煤炭气化技术	051
1.4.5 煤炭液化技术	052
1.4.6 洁净燃烧与发电技术	053
1.4.7 粉煤灰综合利用技术	057
1.4.8 煤矸石综合利用技术	059
参考文献	060

2

煤化工过程中有害元素的迁移与控制

2.1 煤中硫的迁移与控制	062
---------------------	-----

2.1.1	煤中硫的分布特征	062
2.1.2	煤中硫的分析方法	064
2.1.3	煤中硫的成因	066
2.1.4	煤转化过程中硫的化学变化与迁移	067
2.1.5	硫的控制	077
2.2	煤转化过程中氮的迁移与控制	089
2.2.1	煤中氮的结构形式与分析	089
2.2.2	煤利用过程中氮的变化和迁移	091
2.2.3	煤燃烧过程中氮的控制	108
2.3	有害痕量元素的迁移与控制	117
2.3.1	煤中微量元素及烟气中汞的含量与分析	117
2.3.2	煤中微量元素的存在形态	123
2.3.3	微量元素的环境影响和排放規制	128
2.3.4	微量元素在煤燃烧和气化中的迁移	130
2.3.5	有害微量元素的排放控制	139
2.4	小结	146
	参考文献	147

3

煤化工过程中主要污染物的净化技术

3.1	煤化工过程中重污染有机废水的处理技术	149
3.1.1	含酚废水处理技术	149
3.1.2	焦化废水及煤气化废水处理工艺	162
3.1.3	煤化工生产甲醇和合成氨废水处理工艺	162
3.2	煤化工过程中废气除尘技术	164
3.2.1	常见除尘器	164
3.2.2	煤化工过程中废气除尘工艺	169
3.2.3	出焦烟尘污染控制	173
3.2.4	焦炉干熄焦	176
3.3	煤化工过程中烟气脱硫技术	191
3.3.1	烟气脱硫技术及应用概况	192
3.3.2	湿法烟气脱硫技术	195
3.3.3	干法烟气脱硫技术	212
3.3.4	半干法烟气脱硫技术	216
3.3.5	烟气脱硫新技术	225
3.4	煤化工过程中烟气脱硝技术	227

3.4.1	烟气脱硝技术分类	228
3.4.2	选择性催化还原法	229
3.4.3	选择性非催化还原法	234
3.4.4	混合 SNCR-SCR 工艺	241
3.4.5	等离子过程烟气脱硝技术	243
3.4.6	吸附法	244
3.4.7	湿法烟气脱硝技术	246
3.5	煤气和烟气脱重金属技术	248
3.5.1	烟气中重金属的脱除	248
3.5.2	烟气中汞的控制	251
3.6	煤气和烟气的脱氯技术	258
3.6.1	煤气脱氯技术的研究	258
3.6.2	烟气脱氯技术的研究	266
	参考文献	280

4

煤化工过程中 CO₂ 的减排、储存与利用技术

4.1	CO ₂ 对地球环境的影响	282
4.1.1	温室效应与全球温暖化	282
4.1.2	化石能源利用与 CO ₂ 排放的关系	284
4.1.3	CO ₂ 的减排行动	286
4.1.4	CO ₂ 的减排对策	287
4.1.5	提高能量利用效率	287
4.1.6	向低碳能源的转换	289
4.2	CO ₂ 的回收技术	291
4.2.1	概述	291
4.2.2	主要回收方法	293
4.2.3	煤燃烧后 CO ₂ 回收技术的开发	300
4.2.4	O ₂ /CO ₂ 燃烧技术 (Oxy-fuel 燃烧技术)	305
4.2.5	燃烧前回收 CO ₂ 技术	307
4.3	二氧化碳的利用与储存	309
4.3.1	二氧化碳的基本性质	309
4.3.2	二氧化碳的利用	310
4.3.3	二氧化碳的储存	312
4.4	小结	319
	参考文献	319

1.1 煤中的有害元素（常量与非常量）

煤作为我国常规主要能源之一的地位，在相当长的一段时间里都不会改变。煤通过燃烧和气化为人类提供能源与化工原料，但在应用过程中会排放大量的废水、废气和固相污染物，严重影响着人类赖以生存的环境与生态平衡。所以，煤炭总是和不清洁联系在一起。

1.1.1 煤的元素组成

煤是成煤植物在不同的地质条件下，经过漫长的地质演化形成的，是由芳香族稠环有机化合物和矿物杂质组成的复杂混合物，不但含有各种多聚体和官能团，还含有复杂的无机化合物。迄今为止，人类已经从煤中发现了 84 种元素，几乎包括了元素周期表中的所有元素，其中也包括富集在有机物和矿物质中的多种微量元素。组成煤中的元素按照含量的多少可以分为以下三类：

① 在煤中浓度较大、高于 $1000\mu\text{g/g}$ 的元素 ($>1\%$)，如 C、H、O、N、S、Si、Al 等，通常称为常量元素；

② 在煤中浓度介于 $100\sim 1000\mu\text{g/g}$ 的元素 ($0.5\%\sim 1\%$)，如 Ca、Mg、K、Na、Fe、Mn、Ti、Hg 等金属元素及 Cl、P 等非金属元素，通常称为次要元素；

③ 在煤中浓度低于 $100\mu\text{g/g}$ 的金属和非金属元素，如 As、F、Cd、Ga 等，由于浓度较低被称为微量元素。

根据对煤中微量元素的含量界限划分和研究的实际需要，并考虑到目前术语的采用情况和便于叙述等因素，有人把煤中除常量元素以外的、含量小于 1% 的所有元素统称为微量元素；而著名化学家 Swaine 和唐修义等把煤中平均丰度 $\leq 0.1\%$ 的元素划分为煤中的微量元素；还有一些学者对煤中的微量元素下过不同的定义。由此可见，不同学者对煤中微量元素的含量界定不同，但在大多数文献中是指在煤中除了常量元素 C、H、O、N、S、Si、Al、Fe、Ca 等元素外，含量小于 1% 的其他元素。

1.1.1.1 煤中的常量元素

煤的组成以有机质为主体，有机质主要由碳、氢、氧、氮、硫等组成，其中碳、氢、氧占有机质 95%（质量分数）以上。煤中主要元素在燃烧过程中产生的

污染物，如 SO_x 、 NO_x 、 CO_2 和挥发性有机化合物等，因其排放量大、浓度较高，加之对臭氧层破坏严重，会导致地球气候变暖、引发酸雨，造成土壤酸化、污染水源、危害农作物生长，故对其研究开展较早且很深入。

(1) 碳 碳是煤中最重要的部分，它组成煤炭的大分子骨架，是煤在燃烧过程中产生热量的主要元素。煤的碳含量随煤化程度的加深而增高。泥炭的碳含量为 50%~60%（质量分数，下同），褐煤为 60%~77%，烟煤为 74%~92%，而无烟煤为 90%~98%。在煤化程度相同的煤中，镜质组的碳含量比惰质组低。

(2) 氢 氢是煤中的第二个重要组成元素，也是煤中可燃部分，燃烧时放出大量的热量。煤中氢的含量虽然不高，但它的发热量高，所以在判断煤作为燃料的质量时，应予以考虑。氢含量与成煤原始物质密切相关。腐泥煤的氢含量普遍比腐殖煤高，一般都在 6% 以上，有时达 11%。在腐殖煤中，稳定组分的氢含量最高，镜质组次之，而惰质组最低。随着煤化程度逐渐加深，氢含量有逐渐减少的趋势。

(3) 氧 氧也是组成煤有机质的一个十分重要的元素。煤中氧含量变化很大，并随着煤化程度加深而降低。变质程度越低的煤，氧元素所占的比例也就越大。当煤受到氧化时，氧含量迅速增高，而碳、氢含量明显降低。氧元素在煤的燃烧过程中不产生热量，但能与氢结合生成水，是动力用煤的不利因素。同时氧是煤中反应能力最强的元素，当煤用于热加工时，煤中氧含量对热加工影响较大。

(4) 氮 煤的有机质中氮的含量比较少，它主要来自成煤植物中的蛋白质。煤中氮含量多在 0.8%~1.8%（质量分数）的范围内变化，通常也是随煤化程度增高而稍有降低，不过其规律性不很明显。煤中氮在燃烧时，如果温度不高一般不氧化，而呈游离状态 N_2 进入废气中，当煤作为高温热加工原料进行加工时，煤中的氮部分变成 N_2 、 NH_3 、 HCN 及其他一些含氮化合物逸出，而这些化合物可回收制成氮肥（硫酸铵、尿素、氨水等）或硝酸等化学产品。其余部分则留在焦炭中，以某些结构复杂的氮化合物形态存在。

(5) 硫 硫是煤中最有害的杂质。作动力燃烧时，煤中硫燃烧生成二氧化硫，它不仅腐蚀金属设备，而且污染环境，造成大气污染。作为合成氨原料气时，由含硫煤产生的 H_2S 不仅腐蚀金属设备，且使催化剂中毒，影响操作及产品质量。作为生产冶金焦用原料时，煤中的硫大部分转入焦炭，直接影响钢铁质量。因此，各种工业用煤对硫含量都有严格的要求。

煤中硫按赋存状态可分为有机硫和无机硫两大类，有时也有微量的元素硫。煤中各种硫分的总和称为全硫含量，以“ S_t ”表示。

① 煤中的无机硫分为硫化物硫及硫酸盐硫两种。

硫化物硫（ S_p ）绝大部分是以黄铁矿硫形式存在，有时也有少量的白铁矿等

硫化物硫。硫化物硫脱除的难易程度与矿物颗粒大小及其分布状态有关。颗粒大的可利用黄铁矿与有机质相对密度的不同，予以脱除。而颗粒极细又均匀分布的，则难以除去。当煤中全硫含量大于1%时，在多数情况下，是以硫化物硫为主，一般洗选后全硫含量会有不同程度降低。

硫酸盐硫（S_s）的主要存在形式是石膏，也有绿矾等极少数的其他硫酸盐矿物。我国煤中硫酸盐硫含量较小，大部分小于0.1%（质量分数），部分煤为0.1%~0.3%（质量分数）。一般硫酸盐硫含量高的煤，可能曾受过氧化。

② 煤有机质中所含的硫称为有机硫，以“S_o”表示。

有机硫主要来自成煤植物中的蛋白质和微生物的蛋白质。有机硫组成很复杂，主要由硫醚、二硫化物、硫醇和硫酮、噻吩类杂环硫化物及硫醚化合物等组分和官能团所构成。有机硫与有机质紧密结合，分布均匀，很难脱除。一般在低硫煤中，往往以有机硫为主，经过洗选后，有时精煤的全硫含量反而增高。

1.1.1.2 煤中的微量元素

煤中有些微量元素在环境中累积到一定浓度时，将对环境和人体产生危害或潜在危害，这些元素称为煤中具有环境意义的微量元素（environmental trace elements, ETES），也有人称其为潜在毒害微量元素（potentially toxic trace elements, PTTEs）。

Swaine 列出了煤中对环境产生影响的微量元素 26 种，并按其环境重要性（environmental importance）大小把煤中微量元素分为三类（见表 1-1）。

表 1-1 受环境关注的煤中微量元素

第一类	第二类	第三类
砷 As	硼 B	钡 Ba
镉 Cd	氯 Cl	钴 Co
铬 Cr	氟 F	碘 I
汞 Hg	锰 Mn	镭 Ra
铅 Pb	钼 Mo	铈 Sb
硒 Se	镍 Ni	锡 Sn
	铍 Be	铊 Tl
	铜 Cu	
	磷 P	
	钍 Th	
	铀 U	
	钒 V	
	锌 Zn	

美国《洁净空气法修正案》（CAAA，1990）列出的 189 种有害大气污染物（hazardous air pollutants, HAPs）中，有 12 种元素及其化合物存在于煤中；1998 年起，美国的燃煤电厂必须评估和报告每年排放的有毒化学物质总量，其中包括

20 种具有环境意义的微量元素 (Ag、As、Ba、Be、Br、Cd、Cl、Co、Cr、Cu、F、Hg、Mn、Mo、Ni、Pb、Sb、Se、Th 和 Zn); 美国其他一些法规 and 中国的许多法规也规定了一些具有环境意义的微量元素种类及其在水体和大气中的含量限度。

Swaine 和 Goodarzi 强调指出, 这些对煤中具有环境意义微量元素的确定及分类只不过是根据元素本身的毒性和已发生过的污染事例提出的需要重视的元素而已, 对于人体或者动植物而言, 没有绝对有害的元素, 煤中这些微量元素只有在特定条件下并达到一定浓度才对环境具有负面效应。有的元素对于生物体是必需元素, 所以这些元素缺乏和超过一定限度, 对生物体都是有害的。

1.1.2 煤中微量元素的含量与分布

煤中微量元素的含量与分布是研究煤中微量元素环境地球化学的基础。煤中微量元素对环境的危害程度取决于元素的种类、元素在煤中的含量、赋存状态、利用方式 (包括燃烧工艺) 和表示环境介质条件参数等, 其中微量元素含量高低是决定其在环境中释放量多少的重要因素之一, 尤其是环境意义微量元素的含量决定了煤对环境的影响程度。

1.1.2.1 微量元素的评价指标——富集系数

富集系数是评价微量元素富集程度影响的重要参数, 其基本含义是将样品中微量元素浓度与基线中微量元素浓度进行对比, 据此来判断表示环境介质中微量元素的污染状况。为了表示微量元素在飞灰和底渣中的赋存、挥发趋势, 不同学者提出了各自的相对富集系数。

王起超等人采用地球化学富集因子 K 来表述元素的集散状态。其表达式为:

$$K = \frac{C_{in}/C_{Fe_n}}{C_{ic}/C_{Fec}} \quad (1-1)$$

式中, C_{in} 、 C_{Fe_n} 分别为灰中 i 元素及 Fe 含量; C_{ic} 、 C_{Fec} 分别为煤中 i 元素及 Fe 元素含量。该表示方法是以煤和灰中 Fe 元素含量作为参照标准。

Cenni 等人采用相对于底灰的相对富集系数 B_{BHRE} :

$$B_{BHRE} = \frac{C_{if} - C_{ib}}{C_{ib}} \quad (1-2)$$

式中, C_{if} 、 C_{ib} 分别为飞灰和底渣中 i 元素含量。这种表示方法避免了由于煤中微量元素不易测定而带来的误差。

Meij 提出的相对富集系数 (E_{RE}) 表达式为:

$$E_{RE} = \frac{C_{in}}{C_{ic}} \times \frac{(A_{ad})_c}{100} \quad (1-3)$$

式中, $(A_{ad})_c$ 为原煤中空干基灰分。该相对富集系数只考虑了原煤中灰分含量对富集系数的影响, 并没有考虑飞灰和底渣中灰分的变化对富集系数的影响。改